

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky**

**Simulace vláknových Braggovských mřížek v senzorových
aplikacích**

**Simmulation of Fiber Bragg Gratings in Sensoric
Applications**

2013

Radim Malina

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Radim Malina**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2612R025 Informatika a výpočetní technika
Téma: Simulace vláknových Braggovských mřížek v senzorových aplikacích
Simulation of Fiber Bragg Gratings in Sensoric Applications

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je provedení simulací závislosti centrální vlnové délky světla odraženého Braggovskou mřížkou v optickém vlákne v závislosti na působících vnějších veličinách. Výsledky simulací budou ověřeny experimentálně.

1. Vytvoření vlastního simulačního grafického rozhraní v prostředí C# pro simulace přenosové funkce vláknové Braggovské mřížky v závislosti na teplotě a mechanickém napětí..
2. Srovnání simulace s výsledky komerčního software OptiSystem.
3. Experimentální ověření výsledků simulací na mřížkách o vlnové délce 850 nm. a 854,4 nm..

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] OTHONOS, Andreas; KALLI, Kyriacos. *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Boston (USA): Artech House, 1999. 422 stran. ISBN 0-89006-344-3.

[2] SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Základy fotoniky*. Vydání 1. Praha: Matfyzpress, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-00-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Skapa, Ph.D.**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 07.05.2013



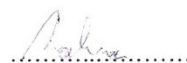
doc. Dr. Ing. Eduard Sojka
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. května 2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Bok', followed by a dotted line for a signature line.

Podpis

Rád bych poděkoval Ing. Janu Skapovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na vláknově optické Braggovské mřížky. V první části je popsána historie a vlastnosti Braggovských mřížek. Poté navazují typy Braggovských mřížek a vlastní výroba Braggovské mřížky. V další části je popsáno vlastně vytvořené simulační grafické rozhraní v prostředí C# pro simulace vláknové Braggovské mřížky. Následuje část, kde jsou porovnány výsledky z komerčního softwaru OptiSystemu s vytvořeným simulačním grafickým rozhraním. V poslední části jsou experimentálně ověřeny výsledky simulací na použitých mřížkách.

Klíčová slova

Braggovské mřížky, C#, OptiSystem

Abstract

This thesis is specialized on the fiber optical Bragg gratings. The history, characteristics, types and manufacture of the Bragg gratings are described in the first part. Created simulation graphic interface in C# for simulation fiber Bragg grating is described in the next part. In the other part, the results from commercial software OptiSystem are compared with created simulation graphic interface. In the end the results of simulations are experimentally tested on used gratings.

Key Words

Bragg gratings, C#, OptiSystem

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratky:

UV	-	ultraviolet (ultrafialové)
KrF laser	-	krypton fluoridový laser

Symbols:

a	-	poloměr jádra
k	-	míra přenosu
k_i	-	vlnový vektor
k_f	-	vlnový vektor rozptýleného záření
K	-	vlnový vektor mřížky
l	-	délka mřížky
M_p	-	podíl výkonu módu obsažený v jádře
n_{cl}	-	index pláště
n_{co}	-	index jádra
n_{eff}	-	efektivní index lomu
n_0	-	střední hodnota indexu lomu jádra
p_e	-	efektivní napěťově optická konstanta
p_{11} a p_{12}	-	komponenty napěťově optického tenzoru
r	-	vzdálenost z jednoho konce vlákna k fázové masce
R	-	odrazivost
ν	-	Poissonovo procento
V	-	normalizovaný kmitočet vlákna
z	-	souřadnice souhlasná s osou vlákna
Δk	-	rozladění vlnového vektoru
Δn	-	amplituda odchylky indexu lomu (indukované)
λ	-	vlnová délka
λ_B	-	centrální Braggovská vlnová délka
λ_w	-	UV vlnová délka
Λ_B	-	centrální Braggovská prostorová perioda mřížky
φ	-	poloviční úhel mezi průsečíkem UV paprsků
Ω	-	vazební koeficient

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Braggovské vláknové mřížky.....	2
2.1 Historický pohled	2
2.2 Vlastnosti braggovských mřížek	3
2.2.1 Braggovská mřížka	3
2.2.2 Jednotná odrazivost Braggovské mřížky	4
2.2.3 Mechanické napětí a teplotní citlivost Braggovské mřížky	6
2.3 Typy vláknových Braggovských mřížek	7
2.3.1 Běžné Braggovské zrcadlo neboli uniformní Braggovská mřížka	7
2.3.2 Apodizované Braggovské mřížky	8
2.3.3 Blazed Braggovská mřížka	8
2.3.4 Chirped Braggovská mřížka	9
2.4 Výroba Braggovských mřížek	10
2.4.1 Vnitřní zapisování Braggovské mřížky	10
2.4.2 Boční zapisování.....	11
2.4.3 Fázová maska	13
2.4.4 Zapisování mřížky během vytahování z preformy	16
3 Popis vlastního simulačního grafického rozhraní pro simulace vláknové Braggovské mřížky.....	17
3.1 Zadávání hodnot a menu.....	17
3.2 Vypočtené hodnoty.....	18
3.3 Log.....	19
3.4 Graf.....	20
4 Srovnání simulace se software OptiSystem	21
4.1 Simulace a porovnání pro centrální vlnovou délku 1550 nm	21
5 Experimentální ověření výsledků simulací	24
5.1 Měření a porovnání výsledků pro mřížku 850 nm.....	24

5.2 Měření a porovnání výsledků pro mřížku 854,4 nm.....	26
6 Závěr	28
Použitá literatura	29
Přílohy.....	30

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Schématický nákres Braggovské vláknové mřížky se stálým indexem modulační amplitudy a periody.	3
Obrázek 2.2 Odrazivost spektra Braggovské mřížky jako funkce vlnové délky	5
Obrázek 2.3 Špičkový odraz z Braggovské mřížky (a) pod použitým mechanickým napětím, (b) při různých teplotách. Mřížková špičková odrazivost byla vystředěná v 1548,2 nm pod nulovým mechanickým napětím při pokojové teplotě.....	7
Obrázek 2.4 Odrazivé spektrum Braggovské mřížky s uniformní difrakční fázovou maskou a s fázovou maskou s Gaussovým profilem difrakční efektivity	8
Obrázek 2.5 (a) Blokové schéma blazed mřížky. (b) Vektorový diagram pro Braggovskou podmínku blazed mřížky.	9
Obrázek 2.6 (a) Blokové schéma chirped mřížky s periodickou intenzitou pro světlo přicházející zepředu, dlouhé vlnové délky postupují dále do mřížky, než jsou odraženy zpět. (b) Blokové schéma sestavené z několika mřížek s rostoucí periodou, které se používají pro simulaci dlouhých chirped mřížek.....	9
Obrázek 2.7 Schéma typického zařízení pro vytváření samoindukovaných Braggovských mřížek. Graf ukazuje typický odraz a přenosovou charakteristiku samoindukovaných mřížek.	10
Obrázek 2.8 Toto schéma demonstruje první vně vytvořenou Braggovskou mřížku. Je zde ukázán i přenos a odrazivé spektrum pro 4,4 mm dlouhou Braggovskou mřížku vytvořenou s tímto přístrojem.	12
Obrázek 2.9 a) UV laserové světlo je rozděleno na stejné paprsky stejného výkonu, které se znovu smísí po různém množství odrazů v každé optické cestě. Odrážené paprsky získávají různé orientace. To má za následek nižší kvalitu okrajového vzoru. b) Zde je použito další zvláštní zrcadlo, které se využívá pro dosažení stejného množství odrazů a tím se vylučují různé postranní cíle z interferujících paprsků.....	12
Obrázek 2.10 Schéma fázové masky využitě pro zápis vláknových Braggovských mřížek	13
Obrázek 2.11 Schéma fázové masky pro zápis Braggovské mřížky v optických vláknech. Kladný a záporný paprsek prvního řádu zasahuje do vláknového jádra umístěného ve vzdálenosti h od masky.	14
Obrázek 2.12 Experimentální schéma odrazivosti Braggovské mřížky natáčením vlákna s ohledem na fázovou masku.	14
Obrázek 2.13 Graf závislosti Braggovské vlnové délky na r	15
Obrázek 2.14 Schéma vytváření Braggovské mřížky během vytahování z preformy.....	16

Obrázek 3.1 Ukázka části programu, kde se zadávají fyzikální parametry a vnější vlivy	18
Obrázek 3.2 Ukázka části programu, kde jsou vypočteny hodnoty pro výpočet odrazivosti ...	19
Obrázek 3.3 Ukázka použití logu	19
Obrázek 3.4 Ukázka grafu	20
Obrázek 4.1 Schéma zapojení v Optisystemu pro centrální vlnovou délku Braggovské mřížky $\lambda_B = 1550$ nm	21
Obrázek 4.2 Nastavené hodnoty ve vlastním programu	22
Obrázek 4.3 Vlevo je simulace z Optisystemu, vpravo je simulace z vlastního programu při $\lambda_B = 1550$ nm	23
Obrázek 5.1 a) Schéma pro získání hodnot laseru b) Schéma pro získání hodnot mřížky o příslušné vlnové délce.....	25
Obrázek 5.2 a) Simulace z vlastního programu při $\lambda_B = 850$ nm b) Graf z experimentálního měření pro mřížku o vlnové délce 850 nm.....	26
Obrázek 5.3 a) Simulace z vlastního programu při $\lambda_B = 854,4$ nm b) Graf z experimentálního měření pro mřížku o vlnové délce 854,4 nm.....	27

Seznam tabulek

Tabulka 1: Nastavené důležité parametry komponent z Optisystemu.....	22
--	----

1 Úvod

Vláknové Braggovské mřížky reprezentují klíčový prvek v optických komunikacích a v senzorových aplikacích. V posledních letech bylo publikováno mnoho informací o Braggovských mřížkách použitých v telekomunikacích nebo senzorových aplikacích. Jejich vývoj jde rapidně nahoru a také jejich využití je v různých odvětvích. Stále více se objevují nové způsoby, jak tyto Braggovské mřížky precizně vyrobit, a proto vznikají nové aplikace pro jejich využití. V této bakalářské práci se budu zabývat simulací Braggovských mřížek v různých aplikacích. Bude popsána historie Braggovských mřížek, jejich vlastnosti a typy Braggovských mřížek. Na konci teoretické části budou popsány různé techniky výroby Braggovských mřížek.

V praktické části bude popsán nejprve vlastní program pro simulace odrazivosti Braggovských mřížek v závislosti na vlnové délce. Poté bude ukázáno porovnání výsledků tímto programem s komerčním programem OptiSystem a jejich vyhodnocení.

V poslední části bude ukázáno experimentální ověření simulací na Braggovských mřížkách s hodnocením všech dosažených výsledků a simulací.

2 Braggovské vláknové mřížky

2.1 Historický pohled

První Braggovskou mřížku použitou ve vlákně demonstroval v roce 1978 Hill s jeho spolupracovníky v komunikačním výzkumném centru v Kanadě [1]. Během experimentu studovali nelineární účinky. Při zvyšování výkonu bylo pozorováno zvýšení útlumu vlákna. Zjistili, že v průběhu vystavení se intenzita světla zpětně odraženého z vlákna výrazně zvýšila s časem. Spektrální měření potvrdila, že zvýšení odrazivosti bylo následkem fotoindukovaného indexu lomu mřížky v optickém vlákně nazvané jako Hillova mřížka. To umožnilo dopředně vedené módy odrážet a spojit s odraženými módy.

Tento výsledek způsobil zájem o předtím neznámý fotorefrakční jev, v optických vláknech známý jako vláknová fotocitlivost. V jejich experimentu se laserové světlo o vlnové délce 488 nm šířené do vláknového jádra interferovalo s Fresnelovým odraženým paprskem (4% odrazu z konce vlákna) [2]. Vysoko intenzivní body pozměnily index lomu ve fotosenzitivním vláknovém jádru nastalo. Tím měl index lomu odchylku, který měl stejnou prostorovou pravidelnost jako interferenční vzor, kterým byl vytvořen. Tento index lomu mřížky působí jako distribuovaný reflektor, jenž spojuje přední a opačně šířený světelný paprsek. Pár těchto paprsků poskytuje kladnou zpětnou vazbu, která zvyšuje výkon zpětně odraženého světla. Tím zvyšuje výkon interferenčního vzoru a postupně zvyšuje index lomu ve vysoko intenzivních bodech. Proces pokračoval, dokud odrazivost mřížky nedosáhla úrovně nasycení. Tyto mřížky byly nazvané samoorganizované nebo samoindukované, protože se tvořily samovolně uvnitř optického vlákna. Speciálně navržená vlákna byla dodávána firmou z Kanady a vyznačovala se malým průměrem jádra a obsahovala hodně germania.

V těchto prvních experimentech byl stálý index mřížky s 90% odrazivostí a byl při tom použit argonový laser. Amplituda odchylky indexu lomu (Δn) byla odhadnuta přibližně na 10^{-5} až 10^{-6} . Při rozpínání a při teplotním ladění vlákna byla změřena šířka pásma Braggovských mřížek, která byla velmi omezená (méně než 200 MHz) a udávající délka mřížky byla přibližně jeden metr. Při pohledu na charakteristiky mřížky, byla její využitelnost ihned jasná pro aplikace v telekomunikacích. Mřížky fungovaly, ale popsaná vlnová délka ve viditelné části spektra byla hrozně omezena vybranou aplikací v telekomunikacích.

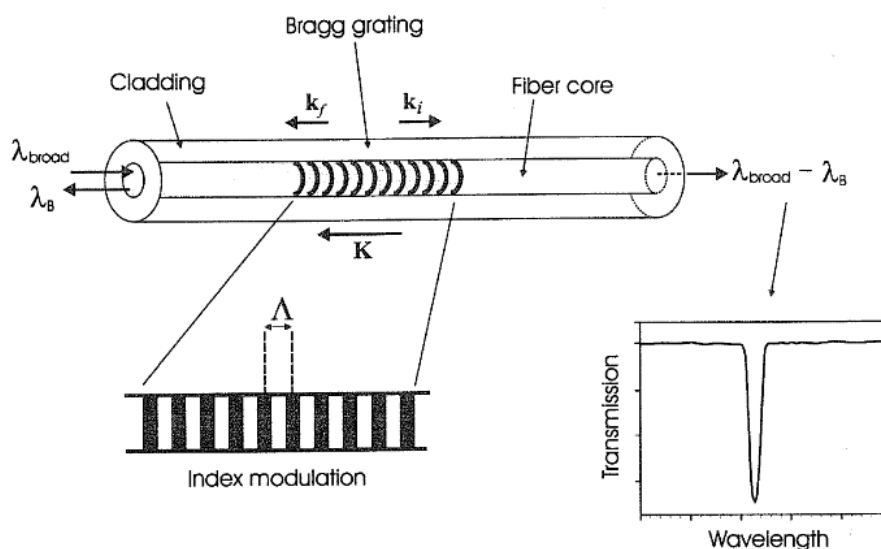
Téměř deset let pokračoval výzkum v tomto odvětví jen sporadicky. Během toho, Lam a Garside navrhli dvoufotonový proces jako možný způsob změny indexu lomu. Téměř o desetiletí později to Stone dokázal jinak [3]. Dnešní výzkumníci po celém světě dokazují, že fotocitlivost může být charakteristická pro mnoho různých druhů vláken [2].

2.2 Vlastnosti braggovských mřížek

V této kapitole budou podrobně popsány vlastnosti charakteristické pro vláknové Braggovské mřížky jako měřitelná vlnová délka, odrazové a přenosové spektrální profily pro jednoduché a komplexní struktury mřížky, závislost vlnové délky mřížky na vnější vlivy, pulsové šíření skrz strukturu mřížky, které se používá pro charakterizování její dynamické odezvy a asociativní nelineární optické jevy. Praktické problémy jako je životnost nebo spolehlivost jsou zkoumány přes tepelný rozklad mřížky a mechanickou silovou degradaci vyplývající z optického vlákna vystaveného intenzivnímu UV ozáření [2].

2.2.1 Braggovská mřížka

V nejjednodušší formě se Braggovská mřížka skládá z periodické modulace indexu lomu v jádře jednomodového optického vlákna. Tyto druhy jednotných vláknových mřížek, kde fáze jsou kolmé k vláknové podélné ose a s mřížkou mají stálou periodu (viz obrázek 2.1), jsou považované za základní stavební kameny pro nejvíce struktur Braggovských mřížek. Světlo vedené podél jádra optického vlákna, bude rozptýleno každou mřížkou. Jestli není splněna Braggovská podmínka, odražené světlo z každé následující mřížky se stává postupně fázově posunuté a nakonec se vyruší. Světlo, které není shodné s Braggovskou vlnovou délkou, se velmi slabě odrazí v každé z mřížek, protože nesouhlasí index lomu. Například mřížka o délce 1 milimetr při vlnové délce $1,5 \mu\text{m}$ a při změně modulačního indexu $\Delta n = 10^{-3}$ je odraženo asi 0,05% dopadajícího světla [2].



Obrázek 2.1 Schématický náčrt Braggovské vláknové mřížky se stálým indexem modulační amplitudy a periody.

Podmínka Braggovské mřížky je jednoduchý požadavek, který splňuje jak zachování energie, tak zachování hybnosti. Zachování energie požaduje, aby kmitočet dopadajícího záření a odraženého záření byl stejný. Zachování hybnosti vyžaduje, aby se příslušný vlnový vektor k_i a vlnový vektor mřížky K rovnal vlnovému vektoru rozptýleného záření k_f , tedy $k_i + K = k_f$, kde vlnový vektor mřížky K má směr k mřížce s velikostí $2\pi/\Lambda_B$. Difrakční vlnový vektor je stejný co do velikosti od příslušného vlnového vektoru, ale má opačný směr. Proto podmínka pro zachování hybnosti je [2]:

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda_B} , \quad (2.1)$$

jejíž zjednodušený tvar vypadá:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda_B , \quad (2.2)$$

kde vlnová délka Braggovské mřížky λ_B je centrální vlnová délka vstupního světla ve vakuu, která bude zpětně odražená z Braggovské mřížky; n_{eff} je efektivní index lomu vláknového jádra centrální vlnové délky ve vakuu a Λ_B je perioda Braggovské mřížky.

2.2.2 Jednotná odrazivost Braggovské mřížky

Předpokládejme jednotnou Braggovskou mřížku tvořenou uvnitř jádra optického vlákna se střední hodnotou indexu lomu jádra n_0 . Profil indexu lomu může být vyjádřený jako [2]:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) , \quad (2.3)$$

kde Δn je amplituda odchylky indexu lomu (typické hodnoty 10^{-5} až 10^{-3}) a z je souřadnice souhlasná s osou vlákna.

Lam a Garside vytvořili teorii, kde popsali odrazivé vlastnosti Braggovských mřížek. Výraz pro odrazivost mřížky s konstantním modulačním rozkmitem a periodou zní:

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} , \quad (2.4)$$

kde $R(l, \lambda)$ je odrazivost, která je funkcí délky mřížky l a vlnové délky λ ; Ω je vazební koeficient; $\Delta k = k - \pi/\Lambda_B$ je rozladění vlnového vektoru; $k = 2\pi n_0/\lambda$ je míra přenosu a $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$.

Vazební koeficient Ω pro sinusoidní změny indexu lomu podél vláknové osy je dán vztahem:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} M_p, \quad (2.5)$$

kde M_p je podíl výkonu módu obsažený v jádře vlákna. M_p může být přibližně $1 - V^{-2}$, kde V je normalizovaný kmitočet vlákna.

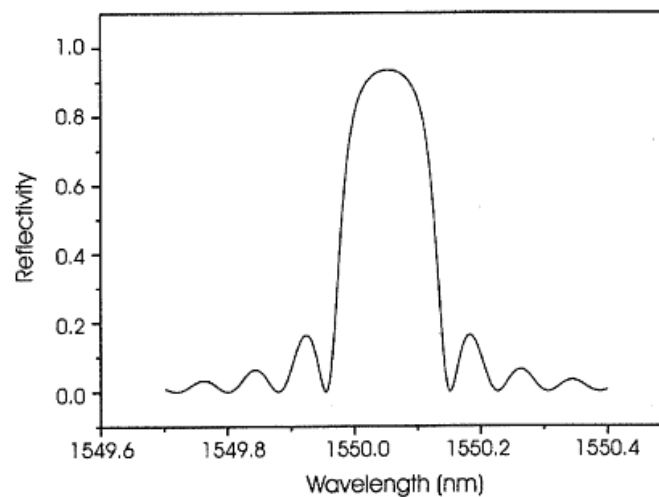
$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) a (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}, \quad (2.6)$$

kde a je poloměr jádra, n_{co} a n_{cl} jsou indexy jádra a pláště.

Na centrální vlnové délce je vektor rozladění roven nula, tedy $\Delta k = 0$. Proto výraz pro odrazivost vypadá:

$$R(l, \lambda) = \tanh^2(\Omega l) \quad (2.7)$$

Odrazivost lze zvýšit tím, že se zvyšuje indukovaný index lomu. Obdobně, když se délka mřížky zvýší, tak i výsledná odrazivost se zvýší. Vypočtené spektrum odrazivosti jako funkce vlnové délky je ukázaná na obrázku 2.2. Postranní výstupky jsou ozvěny, které jsou dány vícenásobnými odrazy do oblasti mřížky a ven z mřížky. Spektrum funkce sinc vychází z matematické Fourierovy transformace harmonického signálu majícího konečný rozsah [4]. Nekonečně dlouhá mřížka by transformovala ideálně delta funkci reakce v oblasti vlnových délek.



Obrázek 2.2 Odrazivost spektra Braggovské mřížky jako funkce vlnové délky

2.2.3 Mechanické napětí a teplotní citlivost Braggovské mřížky

Vlnová délka Braggovské mřížky, což je centrální vlnová délka světla odraženého zpět z Braggovské mřížky, závisí na efektivním indexu lomu jádra a periodě mřížky. Efektivní index lomu, stejně jako periodický rozestup mřížky, budou ovlivňovány změnami mechanického napětí a teploty. Při použití vzorce $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ dojde k posunu centrální vlnové délky v Braggovské mřížce kvůli mechanickému napětí a teplotním změnám podle vzorce [2]:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.8)$$

První člen reprezentuje mechanické napětí působící na optické vlákno. To odpovídá změně rozestupu v mřížce a mechanickému napětí opticky indukované změny v indexu lomu.

Výše popsany účinek mechanického napětí může být vyjádřený jako:

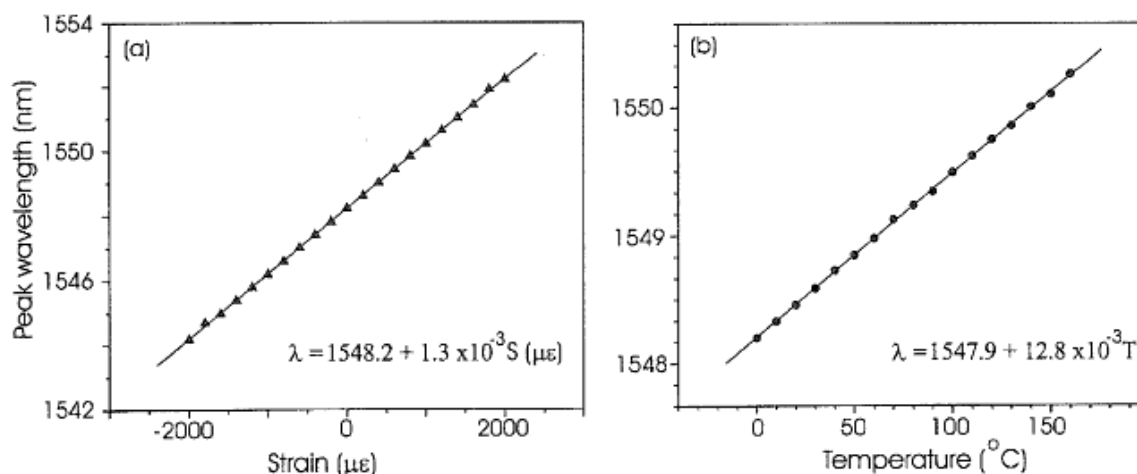
$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_z, \quad (2.9)$$

kde p_e je efektivní napěťově optická konstanta definovaná jako:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (2.10)$$

kde, p_{11} a p_{12} jsou komponenty napěťově optického tenzoru a ν je Poissonovo procento.

Typické hodnoty pro germanium-křemičité optické vlákno jsou $p_{11} = 0,113$; $p_{12} = 0,252$; $\nu = 0,16$ a $n_{eff} = 1,482$. Použitím těchto parametrů a rovnic se očekávaná mechanické napětí 1,2 pm při vlnové délce Braggovské mřížky přibližně 1550 nm použitím 1 μ m Braggovské mřížky. Experimentální výsledky posunu Braggovské centrální vlnové délky s použitým mechanickým napětím jsou ukázány na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Špičkový odraz z Braggovské mřížky (a) pod použitým mechanickým napětím, (b) při různých teplotách. Mřížková špičková odrazivost byla vystředěná v 1548,2 nm pod nulovým mechanickým napětím při pokojové teplotě.

2.3 Typy vláknových Braggovských mřížek

V této části se zaměřím na odlišné druhy vláknových Braggovských mřížek: běžné Braggovské zrcadlo neboli uniformní Braggovské mřížky, apodizované Braggovské mřížky, blazed Braggovsku mřížku a chirped Braggovsku mřížku. Poslední dvě vláknové Braggovské mřížky se vyznačují buď náklonem mřížky, nebo intenzitou mřížky (různou periodou mřížky). Nejběžnější vláknová Braggovská mřížka je Braggovské zrcadlo, které má konstantní periodu mřížky. Blazed mřížka má skloněnou rovinu modulace indexu lomu. Chirped mřížka má periodickou intenzitu, zobrazující monotónní zvýšení v rozestupu mezi mřížkou [2].

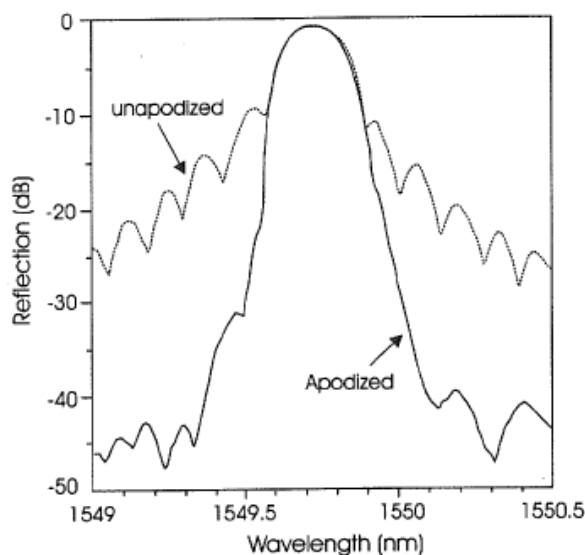
2.3.1 Běžné Braggovské zrcadlo neboli uniformní Braggovská mřížka

Běžné Braggovské zrcadlo je nejjednodušší a nejvíce používaná vláknová Braggovská mřížka. Odrazivost mřížky je závislá na délce mřížky, na vlnové délce, která mřížkou prochází a na rozdílech indexu lomu. V závislosti na parametrech jako je délka mřížky a velikost změny indukovaného indexu, Braggovské zrcadlo může pracovat jako úzkopásmový přenosový nebo odrazivý filtr nebo jako širokopásmové zrcadlo. V kombinaci s dalšími Braggovskými zrcadly mohou tyto zařízení pracovat jako pásmové propusti. Braggovské zrcadla jsou považována za vynikající snímače teplot a mechanického napětí, protože v měření mají zakódovanou vlnovou délku. To odstraní problémy s amplitudovým nebo intenzitním kolísáním, které existuje v mnoha jiných druzích vláken

v senzorových systémech. Každé Braggovské zrcadlo může mít určitou vlastní zakódovanou vlnovou délku [2].

2.3.2 Apodizované Braggovské mřížky

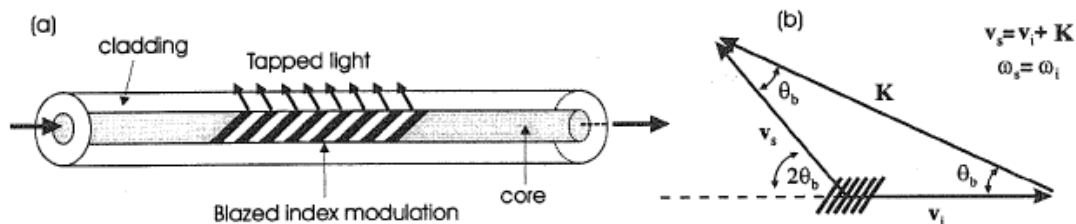
Výsledkem uniformní mřížky je spektrum s hlavním vrcholem, které je doprovázeno hromadou postranních laloků. Postranní laloky jsou způsobeny odrazy protějších konců mřížky. V některých aplikacích je důležité tyto postranní laloky eliminovat, neboli apodizovat odražené spektrum. Apodizace znamená postupné zmenšování změn indexu lomu na krajích mřížky. V praxi je apodizace dosaženo tím, že se mění amplituda změn indexu lomu po délce mřížky, kde největší hodnoty indexu lomu jsou ve středu a nejmenší na krajích mřížky [5].



Obrázek 2.4 Odráživé spektrum Braggovské mřížky s uniformní difrakční fázovou maskou a s fázovou maskou s Gaussovým profilem

2.3.3 Blazed Braggovská mřížka

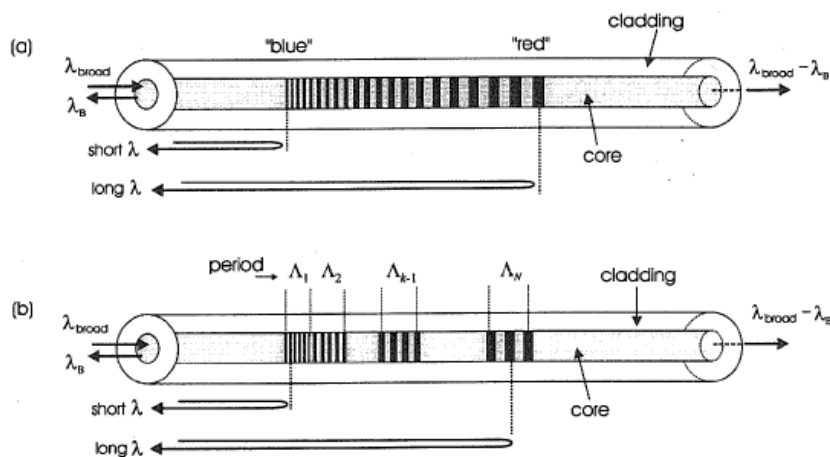
Blazed Braggovská mřížka má skloněnou rovinu modulace indexu lomu, což má za následek, že světlo, které je řízené ve vláknovém jádru, je ztrátově vedeno do pláště nebo vyzářeno. Náklony mřížky a výkon indexové modulace určí efektivitu a šířku pásma světla. Kritérium splňující Braggovskou podmínku mřížky je podobné s Braggovským zrcadlem [2].



Obrázek 2.5 (a) Blokové schéma blazed mřížky. (b) Vektorový diagram pro Braggovskou podmínku blazed mřížky.

2.3.4 Chirped Braggovská mřížka

Nejzajímavějším typem Braggovské mřížky v telekomunikačních aplikacích jsou Chirped Braggovské mřížky. Tato mřížka má monotónní proměnnou periodu, jak je schematicky ukázáno na obrázku 2.6. Tato charakteristická vlastnost je považována za výhodu pro konkrétní použití v telekomunikacích a senzorové technologii, jako je kompenzace disperze.



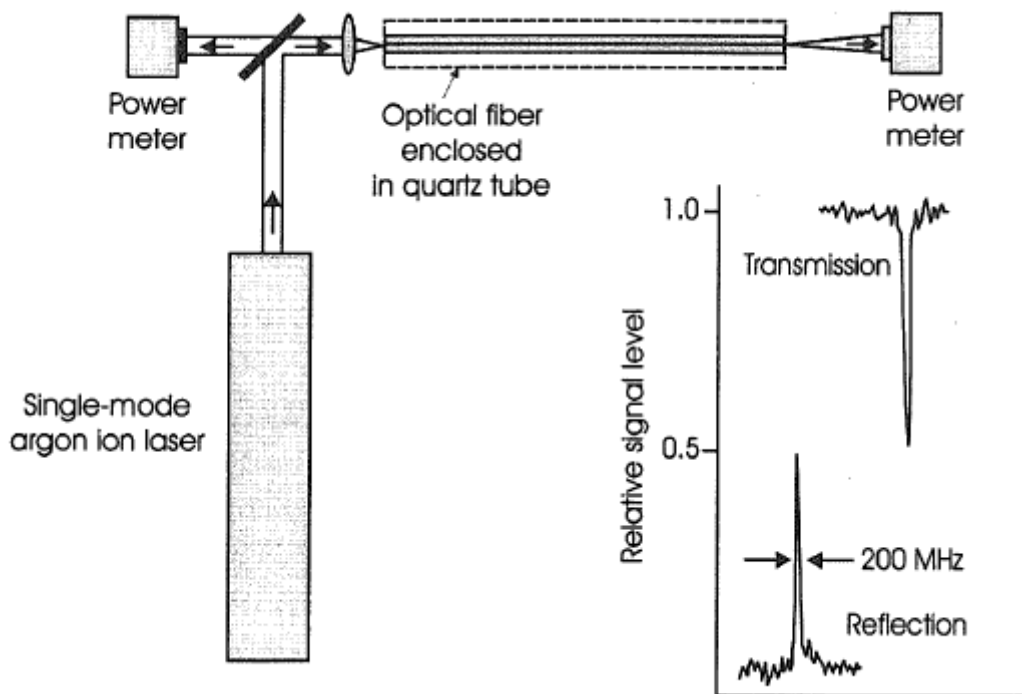
Obrázek 2.6 (a) Blokové schéma chirped mřížky s periodickou intenzitou pro světlo přicházející zepředu, dlouhé vlnové délky postupují dále do mřížky, než jsou odraženy zpět. (b) Blokové schéma sestavené z několika mřížek s rostoucí periodou, které se používají pro simulaci dlouhých chirped mřížek.

2.4 Výroba Braggovských mřížek

Braggovská mřížka se vyrábí použitím germanium-křemičitého optického vlákna. Optické vlákno je fotosenzitivní, index lomu je závislý na velikosti a času vystavení UV zářením.

2.4.1 Vnitřní zapisování Braggovské mřížky

Techniku vnitřního zápisu poprvé demonstroval Hill a jeho spolupracovníci v roce 1978 [1]. Vyžaduje použití jednofrekvenčního laserového světla a díky dvoufotonové absorpci UV světlo iniciuje změnu indexu lomu. Tato technika je jednoduchá a experimentální požadavky jsou minimální. Tyto mřížky jsou omezené Braggovskou vlnovou délkou, která se shoduje s buzenou laserovou vlnovou délkou. Typické experimentální schéma je ukázáno na obrázku 2.7. Laser je použit jako zdroj, oscilování je v jednom podélném módu 514,5 nm (nebo 488 nm) a fotosenzitivním vláknem prochází světlo do jádra. Světlo procházející do jádra interferuje s odráženým světlem pomocí Fresnelových odrazů [4]. Vysokointenzivní body změn indexu lomu jsou permanentně zaznamenány ve fotosenzitivním vlákně. Index lomu má stejnou prostorovou pravidelnost jako vytvořený interferenční vzor. Kvůli malé změně indexu lomu indukované přes tuto metodu, může být dosažena větší odrazivost pro mřížky s větší délkou (až několik desítek centimetrů) [2].



Obrázek 2.7 Schéma typického zařízení pro vytváření samoindukovaných Braggovských mřížek. Graf ukazuje typický odraz a přenosovou charakteristiku samoindukovaných mřížek.

2.4.2 Boční zapisování

Při této technice je UV záření rozděleno na dva paprsky stejného výkonu pomocí rozdělovače. Tyto paprsky jsou znovu spojeny v interferenčním vzoru.. Pár válcovitých čoček soustřeďuje světlo na vlákno a výsledná ohnisková linka je přibližně 4 mm dlouhá 124 μm široká. Perioda Braggovské mřížky Λ_B závisí na UV vlnové délce λ_W a na polovičním úhlu mezi průsečíkem obou UV paprsků φ . Perioda mřížky je teda daná [2]:

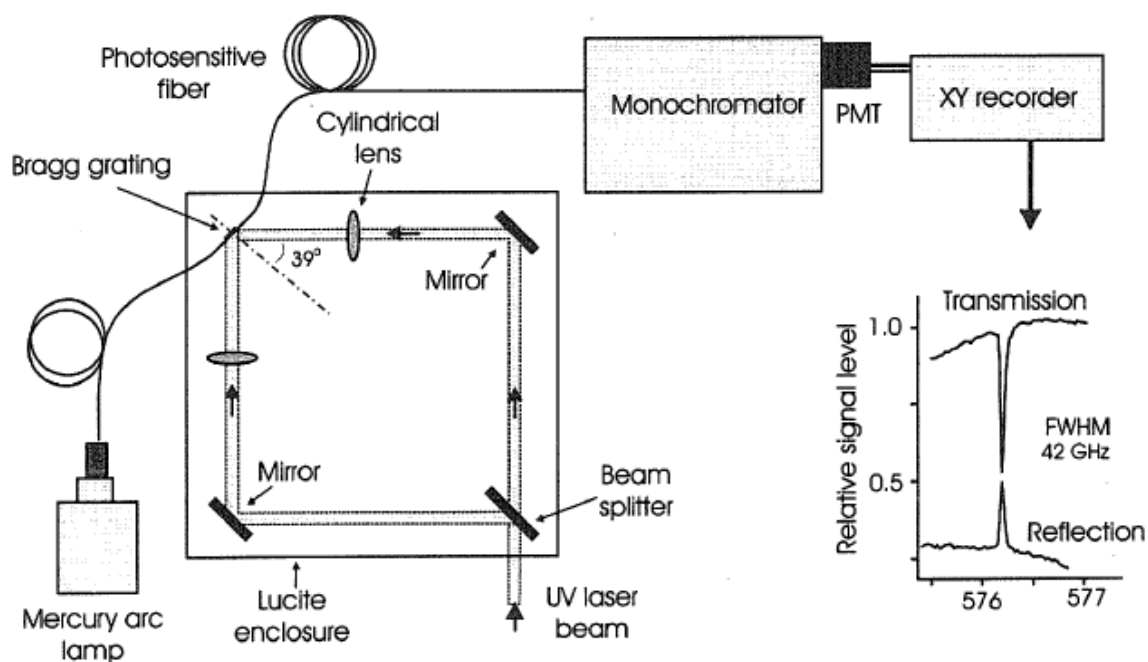
$$\Lambda_B = \frac{\lambda_W}{2\sin\varphi} , \quad (2.11)$$

kde λ_W je UV vlnová délka a φ je poloviční úhel mezi průsečíkem UV paprsků. Při použití Braggovské podmínky $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda_B$, bude vzorec vypadat:

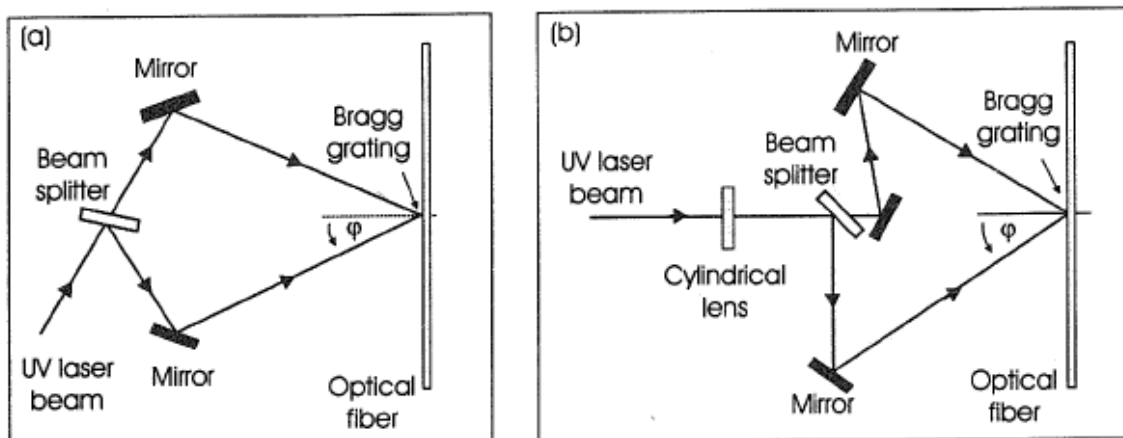
$$\lambda_B = \frac{n_{eff}\lambda_W}{\sin\varphi} , \quad (2.12)$$

kde n_{eff} je efektivní index jádra.

Nejdůležitější výhoda této techniky je schopnost zapsat Braggovskou mřížku v požadované vlnové délce. Toto je proveditelné změnou úhlu mezi UV paprsky. Tato metoda také nabídne kompletní flexibilitu pro vyrábění mřížky různých délek, které dovolí zhotovení vlnové délky pro úzké nebo široké mřížky. Hlavní nevýhoda tohoto přístupu je choulostivost na mechanická kmitání.



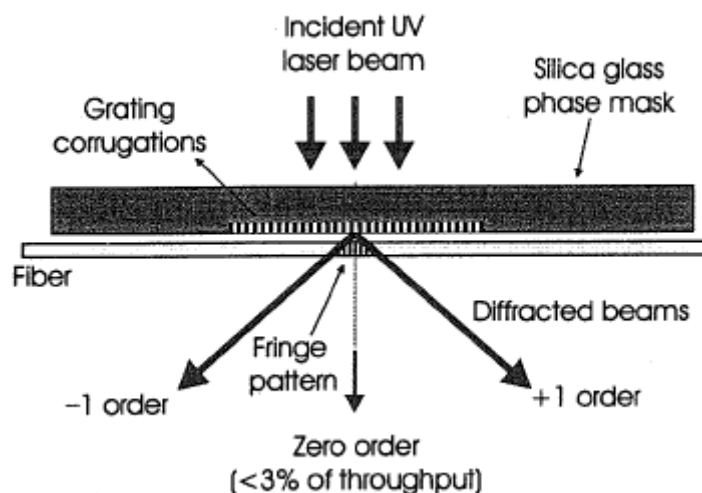
Obrázek 2.8 Toto schéma demonstruje první vně vytvořenou Braggovskou mřížku. Je zde ukázán i přenos a odrazivé spektrum pro 4,4 mm dlouhou Braggovskou mřížku vytvořenou s tímto přístrojem.



Obrázek 2.9 a) UV laserové světlo je rozděleno na stejné paprsky stejného výkonu, které se znovu smísí po různém množství odrazů v každé optické cestě. Odrážené paprsky získávají různé orientace. To má za následek nižší kvalitu okrajového vzoru. b) Zde je použito další zvláštní zrcadlo, které se využívá pro dosažení stejného množství odrazů a tím se vylučují různé postranní cíle z interferujících paprsků.

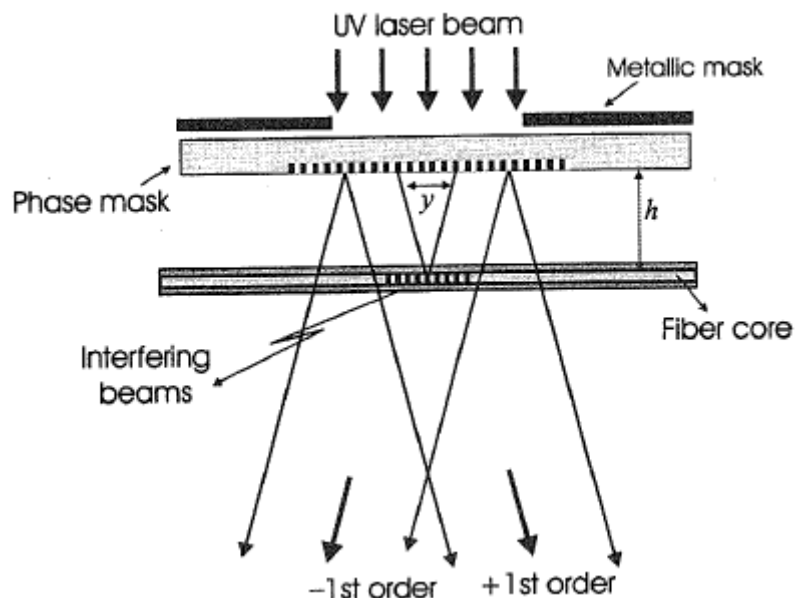
2.4.3 Fázová maska

Jedna z neefektivnějších metod pro výrobu Braggovské mřížky ve fotosenzitivním vlákne je technika zvaná fázová maska. Tato metoda používá difrakční optický prvek (fázovou masku) pro prostorové úpravy UV paprsku [2].



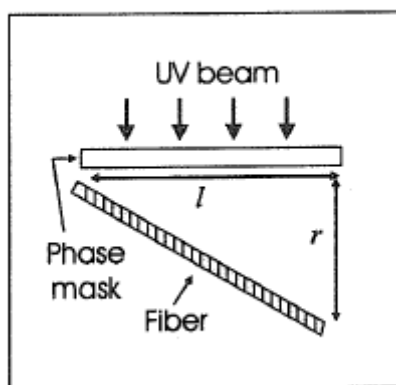
Obrázek 2.10 Schéma fázové masky využitě pro zápis vláknových Braggovských mřížek

Fázové masky mohou být vytvářeny holograficky nebo elektronovou litografií [4]. Fázová maska je vytvořená jako jednorozměrný periodický vzor s periodou Λ_{pm} , vyleptanou do křemenného skla. Profil periodického povrchu mřížky je vybrán takový, že když UV paprsek dopadá na fázovou masku, paprsek nultého řádu je potlačen na méně než pár procent (typicky méně než 3 %) z přeneseného výkonu. A navíc, difrakční paprsky kladného a záporného prvního řádu jsou maximalizovány, každý paprsek typicky obsahuje více než 35 % z přeneseného výkonu. Fázová maska redukuje složitost výrobního systému vláknové mřížky. Jednoduchost použití jediného optického prvku, poskytne robustní a stabilní metodu pro reprodukování vláknové Braggovské mřížky. Oddělení vlákna od fázové masky je kritický parametr ve výrobě kvalitních mřížek a měl by být minimalizován pro UV zdroje, které mají nízkou prostorovou koherenci. Na obrázku 2.11 je vyobrazeno vláknové jádro, které je v jisté vzdálenosti h od fázové masky. Přenesené paprsky kladného a záporného prvního řádu vytváří vzor ve vlákne a vychází z různých částí masky (oddělené mezerou y). Vzdálenost vlákna od fázové masky je identická pro oba paprsky, požadavek na časovou koherenci není kritický pro vytváření vzorů s vysokým kontrastem. Na druhou stranu, jak se zvyšuje vzdálenost h , zvyšuje se vzdálenost y mezi dvěma interferenčními paprsky, které vycházejí z masky. V tomto případě je požadavek na dobrou prostorovou koherenci kritický pro vytváření vzorů s vysokým kontrastem. Vzdálenost h přesáhne prostorovou koherenci UV paprsku, tím se zhorší kontrast, respektive nedojde k žádné interferenci.



Obrázek 2.11 Schéma fázové masky pro zápis Braggovské mřížky v optických vláknech. Kladný a záporný paprsek prvního řádu zasahuje do vláknového jádra umístěného ve vzdálenosti h od masky.

Výhodou je, že můžeme umístit vlákno oproti fázové masce pod jakýmkoliv úhlem. Umístěním jednoho konce vlákna k masce a další konec v nějaké vzdálenosti od masky, je možné měnit indukovanou vlnovou délku Braggovské mřížky.

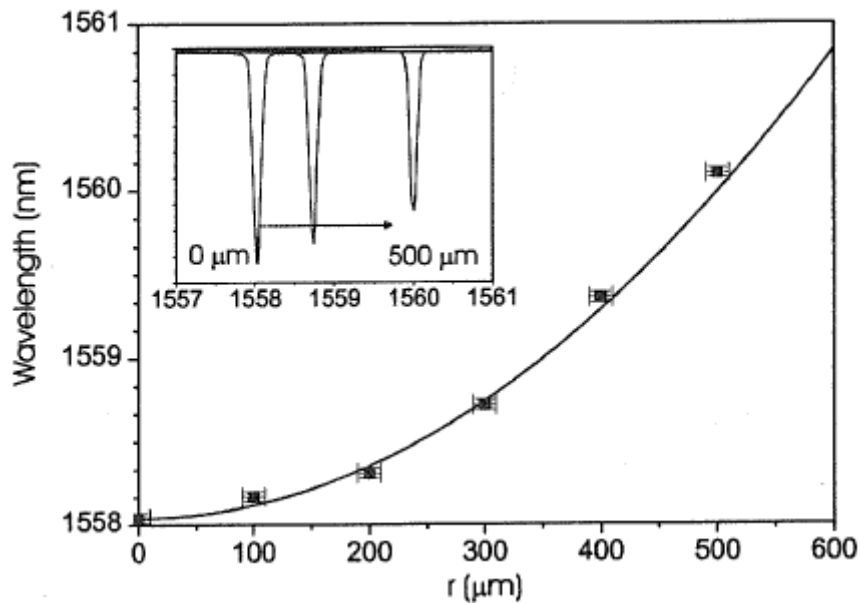


Obrázek 2.12 Experimentální schéma odrazivosti Braggovské mřížky natáčením vlákna s ohledem na fázovou masku.

Podle obrázku 2.12 bude výraz pro výpočet centrální vlnové délky Braggovské mřížky nyní vypadat:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda_B\sqrt{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2}, \quad (2.13)$$

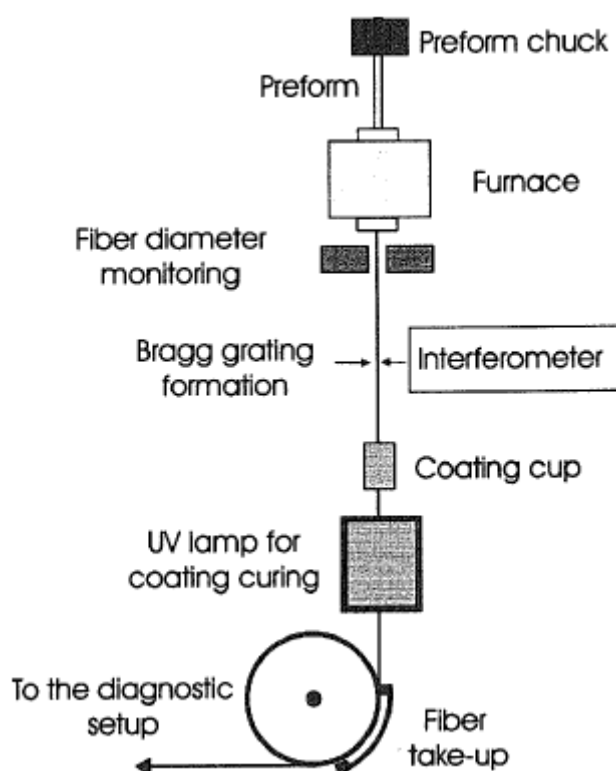
kde Λ_B je perioda vláknové Braggovské mřížky, r je vzdálenost od jednoho konce vlákna k fázové masce a l je délka fázové mřížky. Pro fixní periodu fázové masky, jakákoliv změna r bude mít za následek změnu centrální Braggovské vlnové délky Braggovské mřížky. Například pro fázovou masku o $\Lambda_B = 0,531 \mu\text{m}$ ($l = 10\,000 \mu\text{m}$) byla vyrobena mřížka s vlnovou délkou 1558 nm a hodnotou $r = 0$ (vlákno bylo umístěno shodně s fázovou maskou).



Obrázek 2.13 Graf závislosti Braggovské vlnové délky na r .

2.4.4 Zapisování mřížky během vytahování z preformy

Jedna z významnějších nevýhod při výrobě Braggovské mřížky je to, že na části vlákna musí být odstraněn UV polymerní nátěr, aby vlákno mohlo být odkryté. Tento proces oslabí vlákno v místě mřížky díky znečištění povrchu a to i dokonce, když je vlákno znovu natřené. Tyto problémy nemusí nastat, když je mřížka vyrobena během vytahování z preformy těsně před tím, než je vlákno pokryté. K zapisování lze použít úzkopásmový pulsní KrF laser s velikostí paprsku 205 mm^2 a šířkou pulsu 20 ns [2].



Obrázek 2.14 Schéma vytváření Braggovské mřížky během vytahování z preformy

3 Popis vlastního simulačního grafického rozhraní pro simulace vláknové Braggovské mřížky

V této kapitole bude popsán vytvořený program pro simulace přenosové funkce vláknové Braggovské mřížky v závislosti na mechanickém napětí nebo teplotě. Základní koncept jsem rozdělil na čtyři funkční části. Nejprve je část pro zadávání fyzických parametrů a vnějších vlivů, poté výpočetní část, dále část, kde se zapisují vypočtené hodnoty - tedy log a nakonec část, kde se zobrazuje graf.

3.1 Zadávání hodnot a menu

V této části jsem vytvořil políčka pro uživatele programu, aby mohl zadat hodnoty pro výpočet parametrů důležitých pro výslednou hodnotu odrazivosti. V první části se zadávají fyzikální parametry vlákna, jako jsou délka Braggovské mřížky v milimetrech, poloměr jádra vlákna v mikrometrech, amplituda indukovaného indexu lomu, indexy jádra a pláště vlákna, vlnová délka Braggovské mřížky v nanometrech, hodnoty p_{11} a p_{12} , Poissonovo procento a nakonec hodnota p_t v nanometrech na stupeň Celsia. V druhé části se zadávají vnější vlivy na vlákno - vlnová délka v nanometrech, mechanické napětí v mikrometrech na metr a hodnota teploty ve stupních Celsia. Po stisku tlačítka výpočet jsou všechny hodnoty fyzikálních parametrů uzamčeny po celou dobu výpočtu odrazivosti a vytváření grafu. Tímto způsobem si můžeme sami určovat vlastní vlnovou délku a tím i hodnoty s ní spojené. Po každém stisku tlačítka pro výpočet se provede vždy jeden výpočet hodnot pro odrazivost ze zadaných fyzikálních parametrů a vnějších vlivů. Tím pokaždé vznikne jeden bod v grafu ze zadané vlnové délky a její vypočtené odrazivosti. Uživatel si tak může sám rozmyslet počet výpočtů, zadávané hodnoty vlnových délek a velikost grafu. Je ošetřeno i to, kdyby uživatel zapomněl vyplnit hodnoty délky nebo poloměru jádra. Na obrazovce se objeví varovná hláška a poté se program restartuje do výchozího stavu. Během výpočtů se vypočtené hodnoty zapisují do logu, které může uživatel v případě potřeby využít. Ukázka této části je na obrázku 3.1.

Součástí této části je i jednoduché menu, které obsahuje nové měření, kdy se znovu spustí program, dále konec programu a nápovědu k programu.

Menu Nápověda

Fyzikální parametry

Délka l [mm] =

Poloměr jádra a [μm] =

Amplituda indukovaného indexu lomu =

Index jádra n_{co} =

Index pláště n_{cl} =

Vlnová délka Bragg. mřížky λ_B [nm] =

Hodnota p_{11} =

Hodnota p_{12} =

Poissonovo procento ν =

Hodnota pt [nm/ $^{\circ}\text{C}$] =

Vnější vlivy

Hodnota λ [nm] =

Hodnota ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$] =

Hodnota teploty t [$^{\circ}\text{C}$] =

Obrázek 3.1 Ukázka části programu, kde se zadávají fyzikální parametry a vnější vlivy

3.2 Vypočtené hodnoty

V této části jsem vytvořil políčka, kde se uživatel dozví hodnoty parametrů, které vedou k výpočtu odrazivosti. Je to efektivní napětově optická konstanta, tepelný účinek a účinek mechanického napětí, normalizovaný kmitočet vlákna, podíl výkonu módu obsažený v jádře, vazební koeficient, míra přenosu, rozladění vlnového vektoru, hodnota s a odrazivost. Tyto výpočty mohou být užitečné pro další použití a hlavně k určení odrazivosti pro danou vlnovou délku. Ukázka této části je na obrázku 3.2.

Vypočtené hodnoty

Efektivní napětově optická konstanta p_e =	0.20633888
Napětový účinek $\Delta\lambda_B$ =	1.230174736E-12
Tepelný účinek $\Delta\lambda_t$ =	0
Normalizovaný kmítočet vlákna V =	3.9318489444045
Vláknová módová síla v jádře M_p =	0.935314587664563
Vazební koeficient Ω =	189.572737896926
Míra přenosu k =	5918355.19256916
Vektor rozladění Δk =	4.69716468295205
Hodnota s =	189.514536639483
Odráživost R =	0.545803607759429

Obrázek 3.2 Ukázka části programu, kde jsou vypočteny hodnoty pro výpočet odrazivosti

3.3 Log

Tato část nazvaná jako log slouží pro uchovávání vypočtených hodnot po sobě jdoucích. Při každém stisknutí tlačítka výpočet se zapíše všechny vypočtené hodnoty se zadanými fyzikálními parametry a vnějšími vlivy a uživatel se k nim může později vrátit a použít pro další účely.

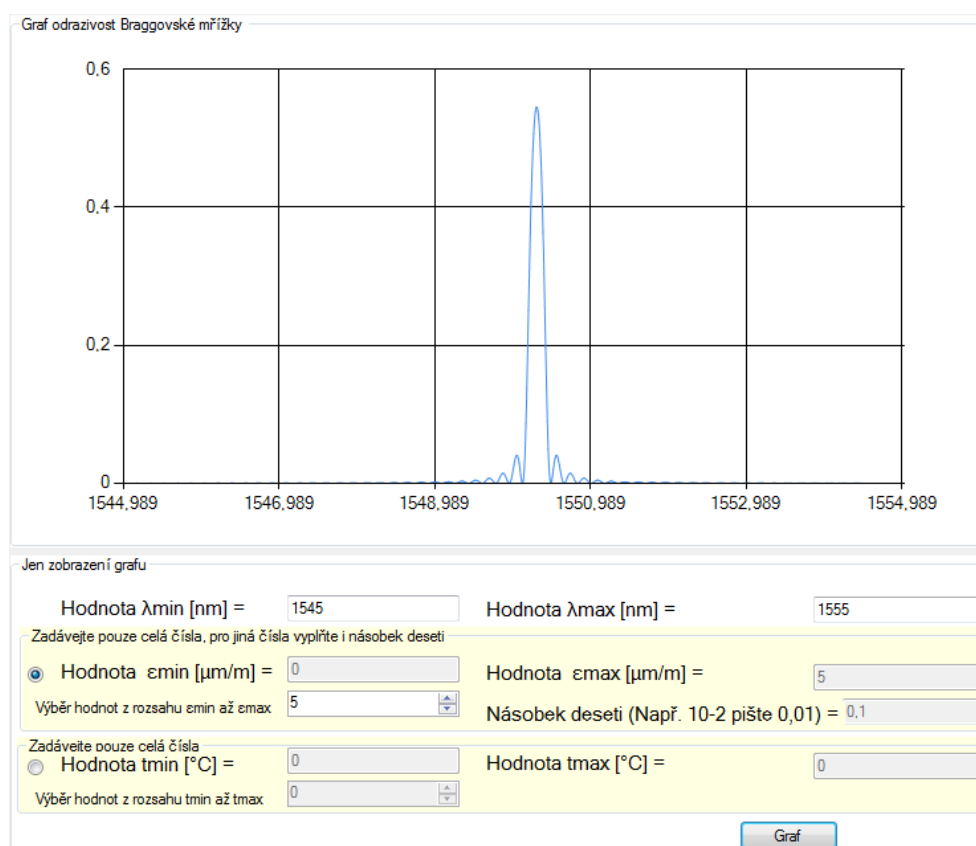
Log

$p_e = 0.20633888$, $\Delta\lambda_B = 1.230174736E-12$, $\Delta\lambda_t = 0$, $V = 3.9318489444045$, $M_p = 0.935314587664563$, $\Omega = 189.572737896926$, $k = 5918355.19256916$, $\Delta k = 4.69716468295205$, $s = 189.514536639483$, $R = 0.545803607759429$,
 při hodnotách $l = 5$, $a = 4$, $n_0 = 0.0001$, $n_{co} = 1.48$, $n_{cl} = 1.46$, $\lambda_B = 1550$, $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $v = 0.16$, $p_t = 0.1$, $\lambda = 1550.000$, $\varepsilon = 1$, $t = 0$

Obrázek 3.3 Ukázka použití logu

3.4 Graf

V této nejdůležitější části se zobrazuje graf odrazivosti Braggovské mřížky. Graf může vznikat z části, kde se zadávají hodnoty a to tak, že uživatel zadává vždy určitou vlnovou délku s hodnotou mechanického napětí nebo teploty. Pro danou vlnovou délku se vypočítá odrazivost, což jsou souřadnice bodu do grafu a tím vzniká graf podle uživatele. Nebo je pro vykreslení grafu použita část se zadanými hodnotami doplněna o rozsah vlnových délek. Pro každou zadanou vlnovou délku (od nejmenší po největší) s krokem 0,001 se vypočte její odrazivost v závislosti na rozsahu mechanického napětí nebo rozsahu teplot, které určují konečnou podobu grafu odrazivosti. Uživatel si musí vybrat pomocí přepínače, zda chce vykreslit graf přenosové funkce vláknové Braggovské mřížky v závislosti na mechanickém napětí nebo teplotě. Když zvolí vykreslit graf přenosové funkce vláknové Braggovské mřížky v závislosti na mechanickém napětí jsou políčka pro zadání teploty nedostupné. Toto platí i obráceně, když si uživatel vybere vykreslit graf přenosové funkce vláknové Braggovské mřížky v závislosti na teplotě. Po stisku tlačítka Graf zůstanou aktivní jen políčka pro zadávání rozsahu vlnových délek, aby uživatel mohl měnit rozsah vykresleného grafu, a zůstane aktivní také výběr hodnot mechanického napětí nebo teploty. Tím může uživatel měnit hodnotu mechanického napětí nebo teploty ze svého zadaného rozsahu a vidět, jak ovlivňuje mechanické napětí nebo teplota graf odrazivosti.



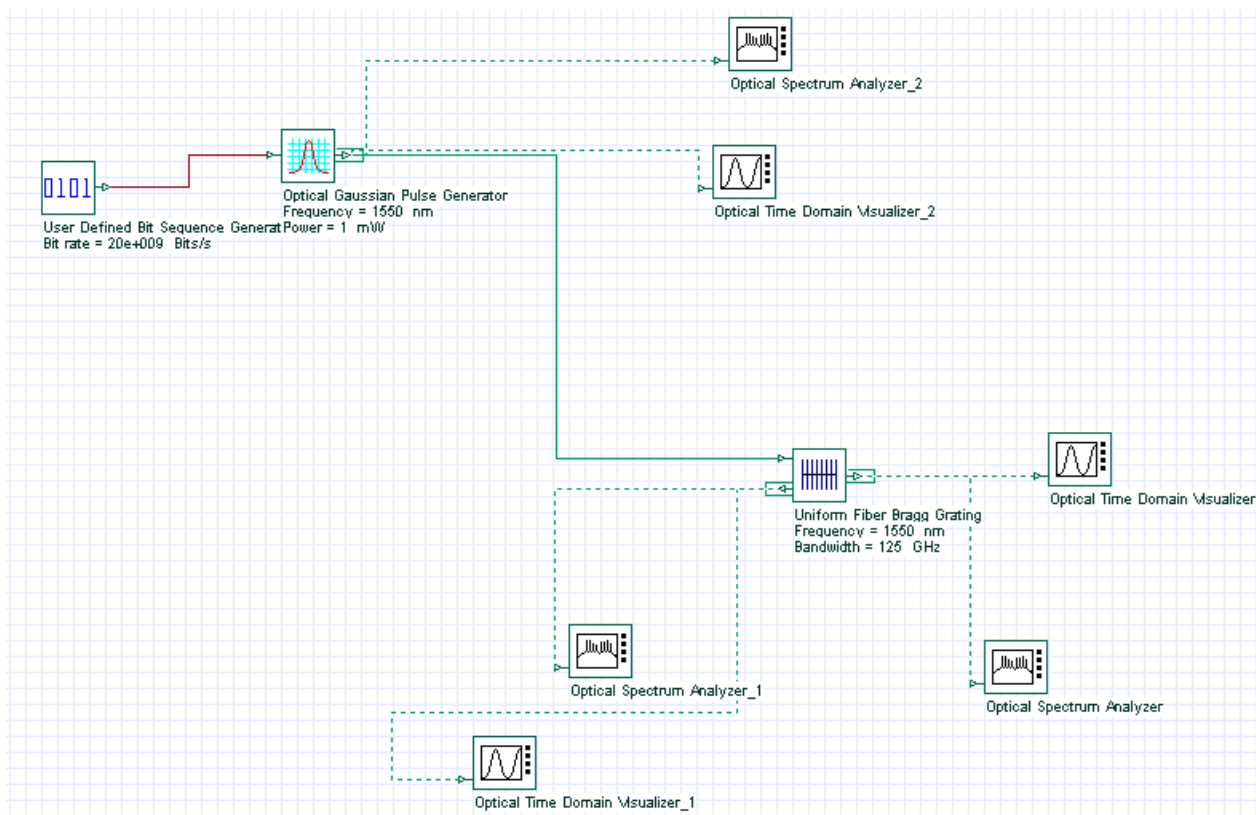
Obrázek 3.4 Ukázka grafu

4 Srovnání simulace se software OptiSystem

Díky komerčnímu softwaru Optisystem od kanadské firmy Optiware lze navrhnout a simulovat optické přístupové sítě. Jelikož je program určen výhradně pro komunikační a ne pro senzorové aplikace, budu zde porovnávat jen výsledky z mého vytvořeného programu s výsledky z Optisystemu bez závislosti na mechanickém napětí a teplotě. Více informací o Optisystemu viz internetové stránky www.optiwave.com [6].

4.1 Simulace a porovnání pro centrální vlnovou délku 1550 nm

První porovnání vlastního programu s Optisystemem bude pro centrální vlnovou délku Braggovské mřížky $\lambda_B = 1550$ nm. Pro toto měření je na obrázku číslo 4.1 znázorněno schéma, které bylo použito. Díky tomuto schématu, můžeme vidět optické a časové spektrum hned za generátorem pulzu, před a za mřížkou. Pro porovnání nám bude stačit jen optické spektrum Braggovské mřížky. V tabulce číslo 1 jsou vybrané důležité parametry komponent z Optisystemu a na obrázku číslo 4.2 jsou nastavené hodnoty pro vlastní program.



Obrázek 4.1 Schéma zapojení v Optisystemu pro centrální vlnovou délku Braggovské mřížky $\lambda_B = 1550$ nm

Komponenta	Parametr	Hodnota
User Defined Bit Sequence Generator	Bit rate	2,00E+10
	Bit sequence	1
Optical Gaussian Pulse Generator	Frequency	1550
	Power	1
	Width	0.05
	Chirp definition	Linear
Uniform Fiber Bragg Grating	Frequency	1550
	Bandwidth	125
	Reflectivity	0.99
Optical Spectrum Analyzer_1	Filter type	Rectangle

Tabulka 1: Nastavené důležité parametry komponent z Optisystemu

Délka l [mm] =

Poloměr jádra a [μm] =

Amplituda indukovaného indexu lomu =

Index jádra n_{co} =

Index pláště n_{cl} =

Vlnová délka Bragg. mřížky λ_B [nm] =

Hodnota p_{11} =

Hodnota p_{12} =

Poissonovo procento ν =

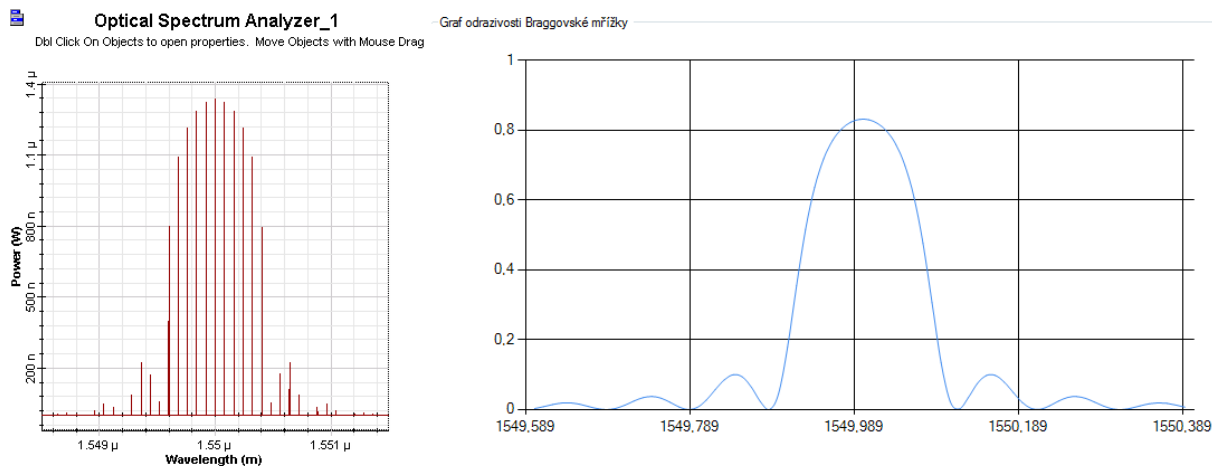
Hodnota pt [nm/°C] =

Hodnota λ_{min} [nm] =

Hodnota λ_{max} [nm] =

Obrázek 4.2 Nastavené hodnoty ve vlastním programu

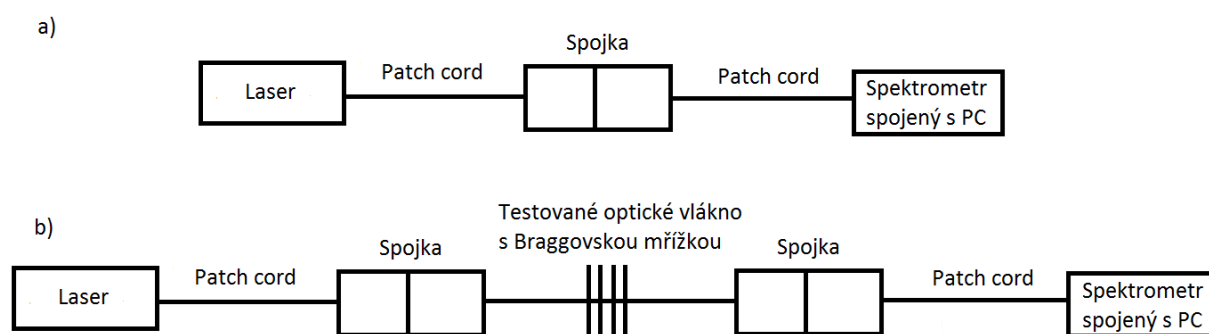
Na obrázku číslo 4.3 jsou výsledné grafy jak z Optisystemu, tak z vlastního programu. Jak lze vidět na tomto obrázku, simulace přenosové funkce vláknové Braggovské mřížky pro $\lambda_B = 1550$ nm jsou velmi podobné, což znamená, že maximální hodnota odrazivosti je při 1550 nm, a proto jsou oba programy pro toto měření nastaveny správně.



Obrázek 4.3 Vlevo je simulace z Optisystemu, vpravo je simulace z vlastního programu při $\lambda_B = 1550$ nm

5 Experimentální ověření výsledků simulací

V této kapitole byla provedena simulace na mřížkách 850 nm a 854,4 nm. Na obrázku 5.1 a) je vyobrazeno schéma zapojení pro obě měření za účelem získání hodnot laseru. Na obrázku 5.1 b) je schéma pro získání hodnot mřížky o příslušné vlnové délce.

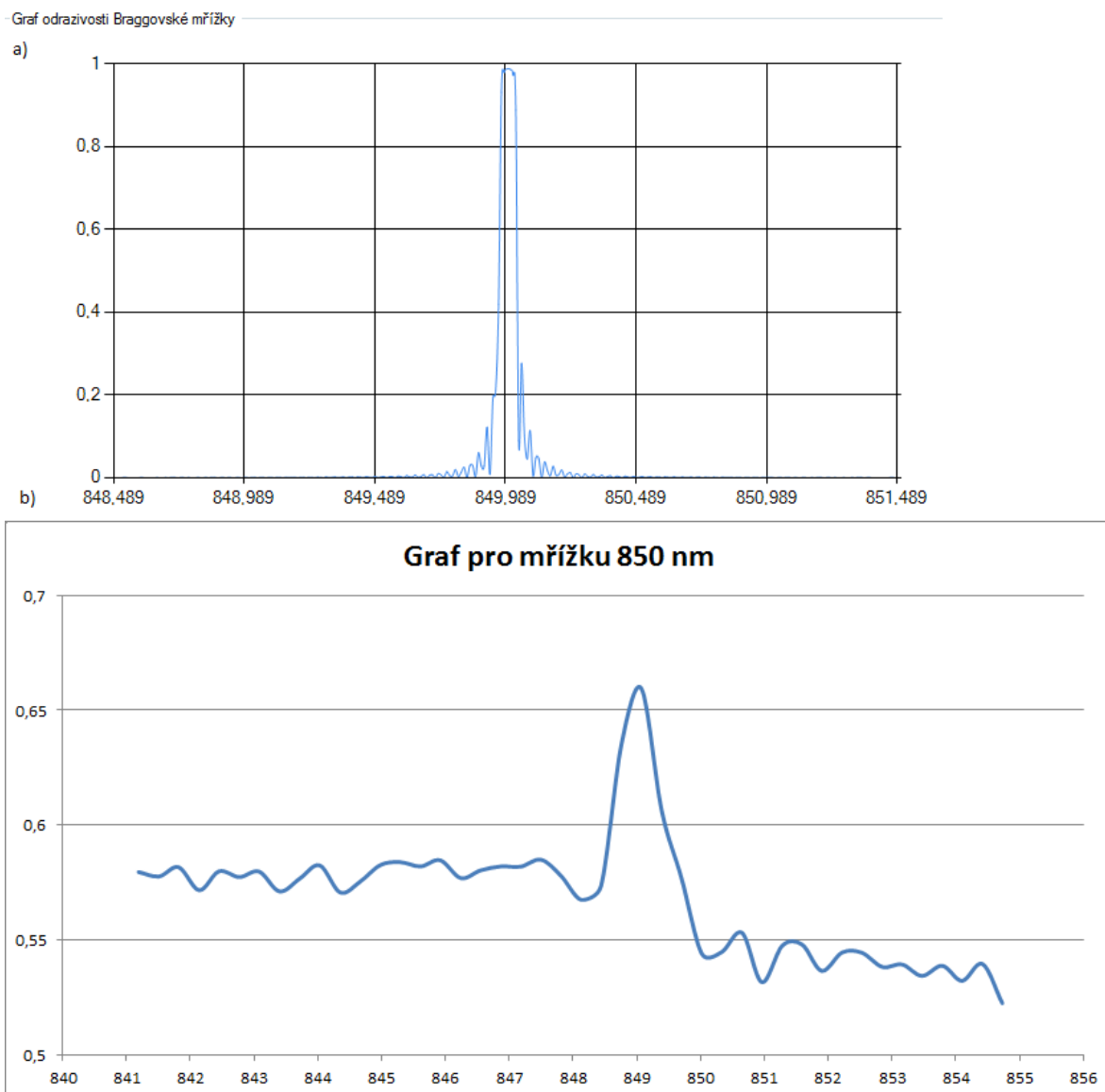


Obrázek 5.1a) Schéma pro získání hodnot laseru

b) Schéma pro získání hodnot mřížky o příslušné vlnové délce

5.1 Měření a porovnání výsledků pro mřížku 850 nm

Při tomto měření jsme použili schéma na obrázku 5.1. Nejprve jsme zapojili první schéma, abychom získali hodnoty laseru. Toto měření jsme provedli pětikrát, abychom vyloučili náhodné jevy při měření. Po každém změření a uložení hodnot laseru jsme použili druhé schéma a získali jsme hodnoty mřížky s vlnovou délkou 850 nm. Toto měření jsme také opakovali pětikrát. Po získání hodnot z laseru a mřížky, se tyto hodnoty musely přepočítat, abychom dostali výsledný graf odrazivosti. To se provede tak, že každá hodnota získaná z mřížky se podělí s hodnotou laseru a tím nám vznikl graf přenosu, který jsme ještě přepočítali na graf odrazivosti. Získané hodnoty jsou připojeny v příloze na CD.

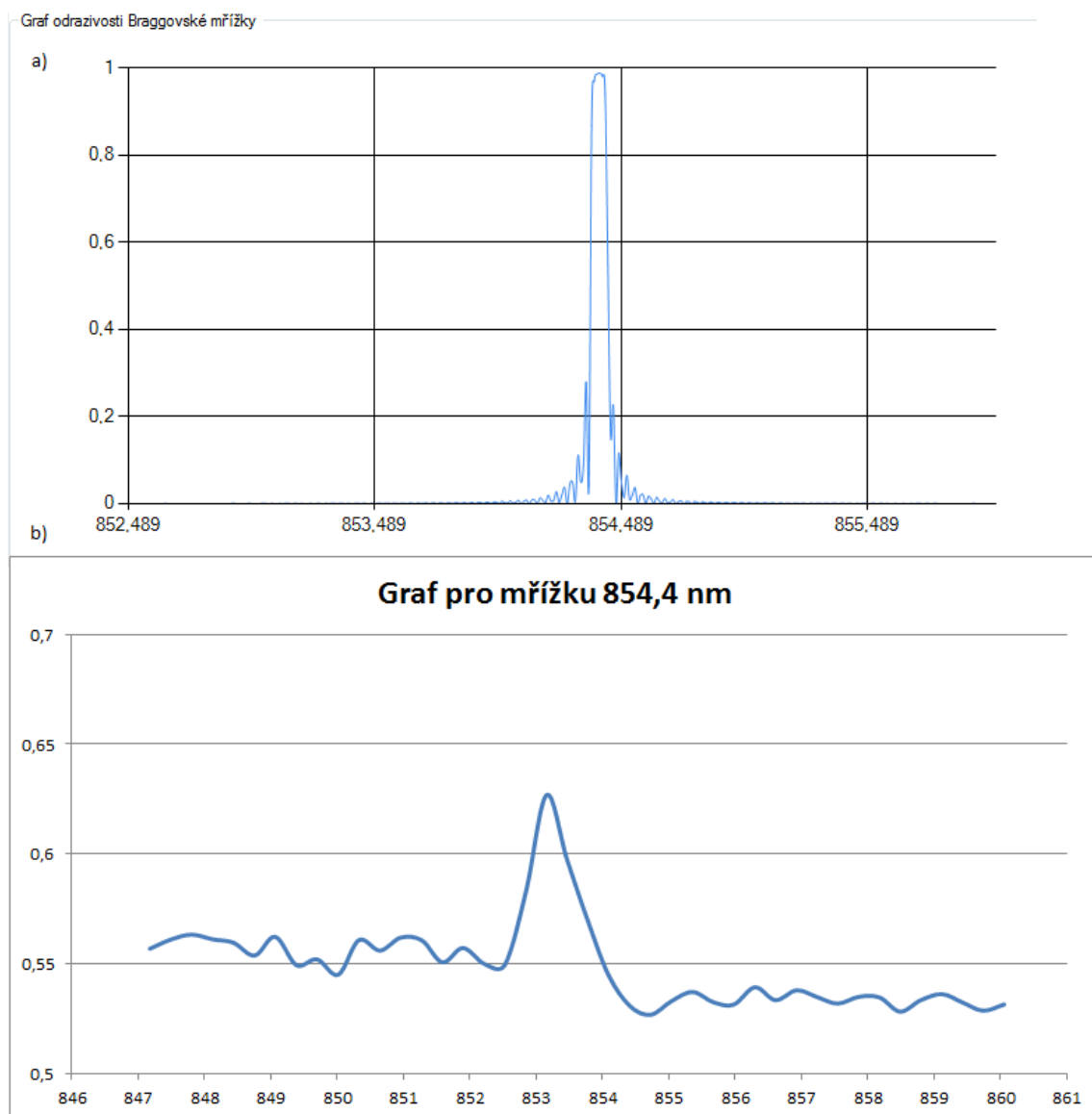


Obrázek 5.2 a) Simulace z vlastního programu při $\lambda_B = 850$ nm. b) Graf z experimentálního měření pro mřížku o vlnové délce 850 nm.

Jak lze vidět na obrázku 5.2, u experimentálního měření došlo k výraznému útlumu na vlnové délce 850 nm, způsobený právě odrazem vlnění od Braggovské mřížky. Změřený průběh přesně nekopíruje nasimulovanou křivku. K tomu by bylo potřeba optický spektrometr s vyšším rozlišením. Avšak pozice hlavního peaku je dobře patrná.

5.2 Měření a porovnání výsledků pro mřížku 854,4 nm

Při tomto měření jsme také použili schéma na obrázku 5.1. Provedli jsme stejný postup jako pro mřížku 850 nm. Získané hodnoty jsou připojeny v příloze na CD.



Obrázek 5.3 a) Simulace z vlastního programu při $\lambda_B = 854,4$ nm. b) Graf z experimentálního měření pro mřížku o vlnové délce 854,4 nm.

I při tomto měření došlo k útlumu na vlnové délce 854,4 nm způsobené odrazem vlnění od Braggovské mřížky, viz obrázek 5.3. Změřený průběh zase přesně nekopíruje nasimulovanou křivku. K tomu bychom opět potřebovali optický spektrometr s vyšším rozlišením. Pozice hlavního peaku je však velmi dobře patrná.

6 Závěr

V této bakalářské práci jsme se zabývali Braggovskými mřížkami. Ukázali jsme si historii Braggovských mřížek, typické vlastnosti a různé typy Braggovských mřížek a jejich výrobu.

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit nástroj pro simulace přenosové funkce vláknové Braggovské mřížky v závislosti na mechanickém napětí a teplotě v jazyce C#. V programu má uživatel dvě možnosti, jak získat požadované informace. Jednou možností je získávání vypočtených hodnot a umístění bodu v grafu. Druhou možností je získání celého grafu a jeho následné úpravy. To dává uživateli víc příležitostí, aby docílil požadovaného výsledku.

Dalším cílem bylo porovnat simulace vytvořeným programem s komerčním programem Optisystem. Jelikož je tento program určen výhradně pro komunikační aplikace a ne pro senzorové aplikace, porovnávání bylo bez závislosti na mechanickém napětí a teplotě.

Nakonec jsme provedli experimentální měření na mřížkách 850 nm a 854,4 nm. Bohužel došlo k výraznému útlumu na zvolených vlnových délkách, kvůli odrazu vlnění od Braggovské mřížky a proto změřené průběhy přesně nekopírovali nasimulovanou křivku.

Nástroj bohužel neumí vykreslovat 3D grafy, a proto může být vykreslení grafu nepřehledné při mechanickém napětí nebo při změnách teplot. Také počet položek pro zadávání hodnot a množství vypočtených hodnot může být chaotické.

Můj nástroj je jedinečný oproti jiným nástrojům, že umí zaznamenat změnu odrazivosti na vlnové délce v závislosti na mechanickém napětí nebo teplotě. Při jeho programování jsem si prohloubil znalosti jazyka C#. Získané zkušenosti jsem využil při tvorbě projektů do jiných předmětů a jistě je ještě využiji.

Použitá literatura

- [1] Hill. K. O.. et al. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Applied Physics Letters*, Vol. 32, 1978. pp. 647-649
- [2] OTHONOS, Andreas; KALLI, Kyrilacos. *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Boston (USA): Artech House, 1999. 422 stran. ISBN 0-89006-344-3.
- [3] Stone, J., Photorefractivity in GeO₂-doped silica fibers, *Journal of Applied Physics*, Vol. 62, 1987, pp. 4371—4374.
- [4] SALEH, Bahaa E. A.; TEICH. Malvin Carl. *Základy fotoniky*. Vydání 1. Praha: Matfyzpress. 1994. 226 s. ISBN 80-85863-00-6.
- [5] Optoelektronika v telekomunikacích a senzorice [Online] <http://opte.imatte.cz/>
- [6] Optiwave. OptiSystem Lite 1.0 : Technical Descriptions [online]. 2009. Dostupné z: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/42444/1/OptiSystem%20Lite%201.pdf>

Přílohy

A. Příloha na CD

Následující tabulka popisuje adresářovou strukturu CD.

Adresář	Popis
/doc	Text bakalářské práce ve formátu PDF/A
/src/Bragg	Visual Studio 2010 Solution – Vlastní nástroj
/Opti	Vytvořené měření v Optisystemu
/Grafy	Grafy a hodnoty experimentálních měření